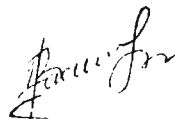


0-755282

На правах рукописи

Василевская Светлана Петровна



**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ
УТИЛИЗАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ
БРОДИЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

Специальность 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Оренбург - 2006

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Оренбургский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Полищук Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Герасимов Михаил Кузьмич

доктор технических наук
Ляпин Николай Михайлович

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский институт
мясного скотоводства, г. Оренбург

Защита диссертации состоится 24 марта 2006 г. в 14⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.080.06 при Казанском государственном техно-
логическом университете по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, зал
заседаний Ученого совета А-330.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государ-
ственного технологического университета.

Автореферат разослан «16» февраля 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета:
доктор технических наук,
профессор



С.И. Поникаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время предприятия пивоваренной и спиртовой промышленности являются источником значительного количества отходов органического происхождения. Эти отходы являются ценным кормовым продуктом, однако, быстро разлагаясь, становятся непригодными для дальнейшего использования. Поэтому переработка основных отходов пивоварения и спиртового производства является важной задачей для обеспечения кормовой базы сельскохозяйственного комплекса и предотвращения загрязнения окружающей среды. Основным отходом пивоварения является пивная дробина, а спиртового производства – спиртовая барда.

Твердые и жидкие отходы бродильных производств могут рассматриваться как вторичные материальные ресурсы (ВМР), так как в них содержатся белковые и минеральные вещества, углеводы и витамины. До настоящего времени объемы утилизации этих отходов в нашей стране были невелики, несмотря на то, что в них содержится до 25 % питательных веществ исходного сырья.

Актуальной задачей является разработка технологии ресурсосберегающей переработки пивной дробины и спиртовой барды в белково-витаминные кормовые продукты. Такая технология должна быть малоотходной для обеспечения охраны окружающей среды.

Работа выполнена в рамках темы «Совершенствование биотехнических систем пищевых производств и кормоприготовления» и включена в тематику НИР Оренбургского государственного университета на 1996 ... 2008 гг., номер госрегистрации 01.960.005780.

Цель работы: Создание методологической основы проектирования технологической линии получения сухого компонента кормов на основе отходов бродильных производств.

Научная новизна. Основные научные результаты, составляющие новизну работы и выносимые на защиту, заключаются в следующем.

1. Предложен комплексный критерий эффективности технологии.
2. Создан комплекс математических моделей, описывающих процессы технологии получения экструдата смеси сухой дробины или сухой барды с зерновыми отходами.
3. Определены неизвестные внешние величины математической модели процесса экструдирования высоковлажного полуфабриката растительного происхождения, в том числе реологические параметры этого продукта.
4. Определены рациональные режимы сорбции экструдированной смесью отрубей и дисперсной фазы отходов бродильных производств дисперсионной среды этих отходов.
5. Определены неизвестные внешние величины математической модели процесса конвективной сушки высоковлажного экструдированного полуфабриката растительного происхождения.

Практическую ценность имеют:

1. Решение задачи полной переработки основного вида отходов бро-дильных производств – пивной дробины и спиртовой барды.
2. Ресурсосберегающий режим сушки пивной дробины и спиртовой барды.
3. Методика комплексной интегральной оценки эффективности технологии.
4. Предложены новые способы утилизации высоковлажных пищевых отходов и конструктивные решения шнековых экструдеров, защищенные патентами РФ №№ 2240918, 2243098, 2245249, 2248720, 2249420, 2251365.

Достоверность полученных результатов:

- исследования проведены на базе фундаментальных закономерностей динамики реологических сред и двухфазных газожидкостных потоков;
- при исследованиях использовались стандартные экспериментальная аппаратура и методики;
- статистическая обработка результатов исследований выполнена стандартными программными средствами.

Реализация результатов диссертационной работы:

На основании полученных результатов научных исследований разработа-тана технологическая схема реутилизации отрубей с высоковлажными отхо-дами броильных производств, принятая для использования на предприятиях Оренбургской области: ЗАО «ПИТ» (г. Новотроицк) и ЗАО «Оренбургская пивоваренная компания». Результаты исследований послужили основой соз-дания учебно-методических материалов по оценке эффективности технологии (на примере производства пива), используемых в учебном процессе ГОУ ВПО «Оренбургский государственный университет» при подготовке студентов спе-циальностей 260601 и 260602 по дисциплине «Учебно-исследовательская ра-бота студентов».

Апробация работы. Основные положения диссертации были доложены на научных конференциях: Международной научно-практической конферен-ции «Проблемы регионального управления рисками на объектах аграрно-промышленного комплекса» (Оренбург, 2002 год); Всероссийской научно-практической конференции «Оптимизация сложных биотехнологических сис-тем» (Оренбург, 2003 год); Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития пищевой промышленности на современном этапе» (Мелеуз, 2003 год); Международной научно-практической конферен-ции «Роль университетской науки в региональном сообществе» (Москва-Оренбург, 2003 год); II Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии и оборудование пищевой промышленности» (Во-ронез, 2004 год); региональной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Оренбургской области (Оренбург, 2004 год); Всерос-сийской научно-практической конференции «Перспективы развития пищевой промышленности в России» (Оренбург, 2005 год); Общероссийской конфе-

ренции молодых ученых «Пищевые технологии» (Казань, 2005 год); Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы подготовки специалистов для предприятий пищевой промышленности» (Уфа-Оренбург, 2005 год).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 7 статьях и 6 докладах на научных конференциях, получены 6 патентов на изобретения.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 210 страниц, в том числе: 151 страницу с рисунками и фотографиями, 18 страниц списка литературы из 193 наименований (из них 31 иностранных) и 41 страницу приложений.

Автор выражает благодарность кандидату технических наук, доценту Попову Валерию Павловичу за ценные практические советы и рекомендации в процессе выполнения данной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности темы и краткому изложению положений, которые выносятся на защиту.

В первой главе «Анализ существующего состояния проблемы утилизации отходов бродильных производств» дана характеристика отходов производства пива и их полезных свойств, том числе пивной дробины. Дана характеристика различных видов спиртовой барды и их полезных свойств. Рассмотрены способы переработки отходов пивного и спиртового производства.

Рассмотрена возможность использования технологии экструдирования для приготовления кормовых продуктов из высоковлажных отходов. Проанализированы различные режимы и способы экструдирования. Дан анализ работ В.А. Силина, Р.В. Торнера, Г.М. Медведева, Г. Шенкеля, Н.И. Назарова, Б.М. Азарова, Ю.А. Мачихина, И.Э. Груздева, В.П. Юрьева и других авторов, посвященных различным аспектам рассматриваемой проблемы.

Рассмотрены различные подходы к сушке высоковлажных пищевых масс по материалам работ А.В. Лыкова, А.С. Гинзбурга, В.В. Красникова, И.Т. Кретьева, И.Ю. Алексаняна.

В соответствии с поставленной целью работы и проведенным анализом состояния вопроса сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Предложить способ утилизации отходов бродильных производств и оценить перспективность использования этого способа для утилизации отходов в виде сухих белково-витаминных продуктов.

2. Экспериментально определить режимы подготовки полуфабрикатов на основе пивной дробины и спиртовой барды и способ введения в них жидкой дисперсионной среды, обеспечивающие устойчивое сохранение заданной формы экструдата в процессе сушки.

3. Определить неизвестные внешние величины математических моделей экструдирования высоковлажных полуфабрикатов растительного происхождения и их последующей сушки.

4. Разработать ресурсосберегающую технологию получения белково-витаминного компонента корма на основе сушки пивной дробины или спиртовой барды без потери растворимых питательных веществ.

5. Предложить новые конструктивные решения оборудования, реализующего предложенную технологию. Экономически обосновать эффективность выполненных исследований.

Во второй главе «Теоретические основы процессов экструдирования и конвективной сушки высоковлажных растительных материалов» приведено аналитическое описание процессов экструдирования и конвективной сушки применительно к предлагаемому продукту.

Процесс экструдирования. Для экструдирования смеси зерноотходов с отходами бродильных производств выбрана наиболее простая схема одношнекового экструдера. Поскольку экструдирование высоковлажного сырья не требует создания высоких давлений будем считать такие экструдеры адекватными разрабатываемой технологии. Принята справедливость реологического уравнения Оствальда-де Вилля. Рабочее пространство разделено на четыре зоны: канал шнека глубиной $h_{ш}$, полость насадки на конце шнека высотой h_k , полость утечек высотой h_y , фильера матрицы диаметром d_m и представлено системой нескольких пар параллельных между собой плоскостей и осесимметричным каналом фильеры. При этом сохраняется свойство непрерывности объемной производительности в шнековом механизме.

Будем для простоты приписывать сжимающим напряжениям в материале, находящемся в рабочем пространстве, положительное значение.

Движение материала в канале шнека. Пренебрегая влиянием лопастей шнека, заменим канал шнека моделью из двух неограниченных параллельных пластин, расположенных на расстоянии, равном глубине канала шнека $h_{ш}$. Расположим систему координат xOy как показано на рисунке 1.

Верхняя пластина 1 движется со скоростью v_c относительно нижней 2. Напряжения сжатия возрастают в направлении вектора скорости v_c . На пластинах проскальзывание материала отсутствует. Будем придерживаться гипотезы, что вблизи пластины 2 имеется слой проскальзывания с реологическими свойствами, отличными от свойств остального материала в канале шнека. Граница этого слоя толщиной h_n обозначена на рисунке 1 пунктиром.

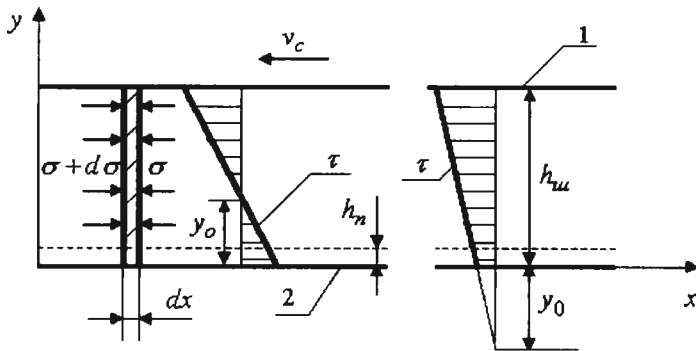


Рисунок 1 – Схема модели шнекового канала:

1 – плоскость, замещающая шнековый цилиндр; 2 – плоскость, замещающая дно шнекового канала.

Уравнение равновесия для данного случая имеет вид

$$\tau = \frac{d\sigma}{dx}(y - y_0), \quad (1)$$

где τ – напряжение сдвига в прессуемом материале;

$d\sigma/dx$ – градиент нормальных напряжений в прессуемом материале;

y_0 – координата плоскости, на которой касательные напряжения $\tau = 0$.

Будем считать, что зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ (градиента скорости dv/dy) в слое проскальзывания удовлетворительно описывается уравнением идеальной жидкости. Тогда для скорости v_n на границе слоя проскальзывания можно получить приближенную зависимость

$$v_n = -\frac{1}{\mu} \frac{d\sigma}{dx} h_n y_0, \quad (2)$$

где μ – абсолютная вязкость материала в слое проскальзывания.

Как следует из (2), скорость проскальзывания направлена в ту же сторону, что и v_c , если $y_0 < 0$, и в сторону, противоположную v_c , если $y_0 > 0$.

Вид решения уравнения (1) при использовании уравнения Оствальда-де Вилля зависит от величины y_0 . Если $0 < y_0 < h_w$, направление касательных напряжений изменяется в канале шнека (рисунок 1) и решение уравнения (1) имеет вид

$$v_1 = v_n + \frac{a_w}{m+1} [(y_0 - h_n)^{m+1} - (y_0 - y)^{m+1}]; \quad h_n \leq y \leq y_0; \quad (3)$$

$$v_2 = v_c + \frac{a_{ш}}{m+1} [(h_{ш} - y_0)^{m+1} - (y - y_0)^{m+1}]; \quad h_{ш} \geq y \geq y_0; \quad (4)$$

где
$$a_{ш} = \left(\frac{1}{\mu'} \right)^m \left| \frac{d\sigma}{dx} \right|^m, \quad m = \frac{1}{n};$$

μ' – коэффициент консистенции материала;

n – индекс течения.

Если $y_0 < 0$, направление касательных напряжений в канале шнека постоянно (рисунок 1) и распределение скоростей описывает уравнение (4).

Если $h_n \leq y_0 \leq h_{ш}$, используя условие непрерывности скорости в канале шнека $v_1 = v_2$, при $y = y_0$ можно определить из уравнений (3) и (4) величину y_0 , задавшись скоростью верхней пластины v_c и градиентом давления $d\sigma/dx$. Исследуя область определения этой функции с учетом (2), можно получить условие попадания координаты y_0 на отрезок $h_n \leq y_0 \leq h_{ш}$

$$-\frac{a_{ш}}{m+1} (h_{ш} - h_n)^{m+1} \leq v_c. \quad (5)$$

Если $y_0 < 0$, величину y_0 можно получить из уравнений (4) и (2), используя граничное условие $v_n = v_2$ при $y = h_n$.

Объемный расход прессуемого материала на единичной ширине пространства между пластинами Q определим интегрированием скорости в канале без учета влияния слоя проскальзывания. Будем полагать, что проскальзывание со скоростью v_n осуществляется непосредственно по нижней пластине. Кроме того, для обеспечения положительного значения расхода преобразуем (3) и (4) так, чтобы приписать скорости v_c положительное значение. Объемный расход материала в канале шнека определен геометрией канала.

Движение материала в полости насадки на конце шнека и полости утечек. Рассмотрим плоскую модель кольцевого пространства между шнековым цилиндром и насадкой на конце шнека, представленную на рисунке 2 в системе прямоугольных координат $Oxuz$.

В этой модели пластины, находятся на расстоянии зазора компрессионного затвора h_x . Нижняя пластина неподвижна, а верхняя пластина движется вдоль оси Oz со скоростью u_c , равной окружной скорости шнекового цилиндра в обратном движении.

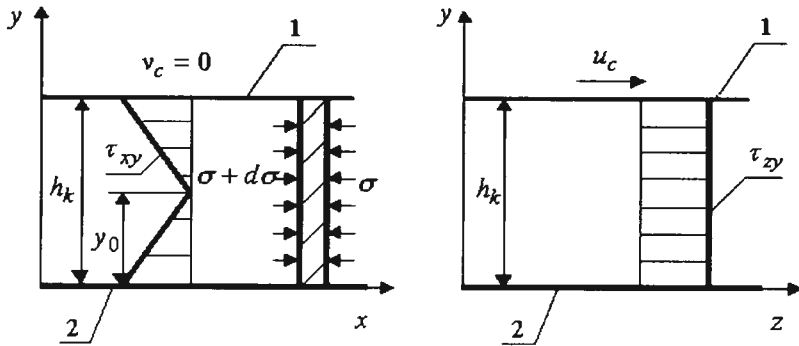


Рисунок 2 – Схема модели полости насадки:

1 – плоскость, замещающая шнековый цилиндр; 2 – плоскость, замещающая боковую поверхность насадки на конце шнека.

Рассмотрим вначале движение прессуемого материала вдоль оси Ox между двумя неподвижными пластинами. Будем считать, что материал прилипает к обеим пластинам. В силу симметрии картины течения распределение касательных напряжений τ_{xy} в канале фильеры симметрично относительно срединной плоскости, поэтому $y_0 = h_k/2$.

Распределение скоростей на участке $h_k \leq y \leq h_k/2$ определяется аналогично формуле (4) с учетом условия $v_c = 0$.

Объемный расход материала на единичной ширине развертки компрессионного затвора Q с учетом симметрии картины скоростей можно получить интегрированием скорости по высоте полости. Объемная производительность через полость насадки определена ее геометрией. Движение материала в направлении оси Oz определено зависимостью $\tau_{zy} = \text{const}$, из которой, используя уравнение Оствальда-де Вилля, можно определить напряжения сдвига, задаваясь величиной u_c .

Движение материала в полости утечек и объемный расход через нее Q_y описываются аналогичным полости насадки распределением напряжений с учетом различия геометрических размеров полости и градиента напряжений.

Движение материала в канале фильеры матрицы. Для экструдирования высоковлажных продуктов растительного происхождения нами предложены конструкции фильер, позволяющие получать полуфабрикат в виде тонкой ленты. Возможная конструкция такой фильеры показана на рисунке 3.

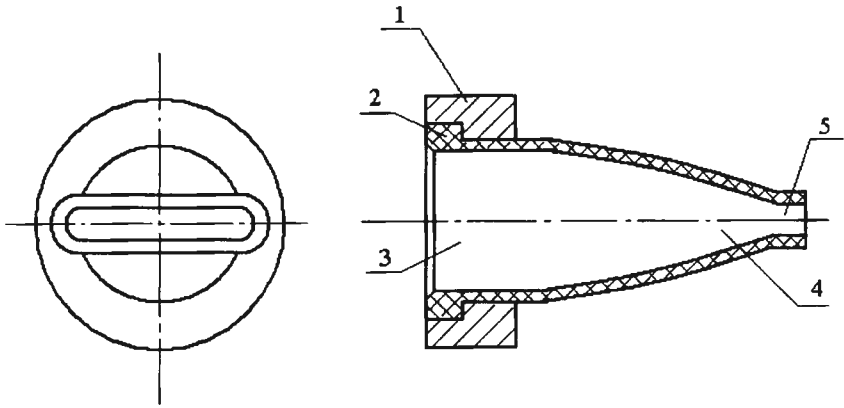


Рисунок 3 – Схема фильеры переменного профиля сечения:

1 – матрица; 2 – упругая оболочка фильеры; 3 – цилиндрический канал; 4 – конфузор; 5 – плоская щель.

Для определения объемного расхода материала Q_ϕ через такую фильеру получена зависимость

$$Q_\phi = \left(\frac{1}{2\mu'} \frac{\sigma_m}{z_{np}} \right)^m \frac{\pi R^{m+3}}{m+3}, \quad z_{np} = \frac{x_{щ}}{c_{щ}^n} + \frac{z_\phi}{c_\phi^n}; \quad (7)$$

где σ_m – нормальное напряжение на входе в фильеру;

R – радиус цилиндрического канала фильеры;

$x_{щ}$ – осевая длина плоской щели канала фильеры;

$$c_{щ} = \frac{1}{2\pi} \frac{m+3}{m+2} \frac{b_\phi}{R} \left(\frac{h_\phi}{R} \right)^{m+2} - \text{коэффициент приведения осевой длины}$$

плоской щели к длине цилиндрического канала радиуса R , создающего такое же сопротивление как данная плоская щель шириной b_ϕ и высотой h_ϕ ;

z_ϕ – осевая длина цилиндрического канала и участка перехода к щели;

c_ϕ – коэффициент отклонения формы канала от цилиндрической, определяемый экспериментально.

Формула (7) может быть использована для приближенного определения объемного расхода через фильеру сложной формы.

Определение параметров процесса экструдирования. Для одношнекового механизма составлена система уравнений неразрывности объемной производительности в четырех рассмотренных полостях. Подставив вместо градиентов напряжений их значения, можно численными методами найти из системы напряжения на границах полостей, которые позволяют вычислить производительность экструдера и мощность сил полезного сопротивления шнекового прессующего механизма.

Процесс конвективной сушки описан по методу академика А.В. Лыкова. Этот метод основан на решении одномерной задачи массопереноса для бесконечной пластины и позволяет определять время сушки до требуемой влажности на основании экспериментально определенных параметров. Время сушки определено отдельно для периода сушки с постоянной скоростью и периода сушки с убывающей скоростью.

В третьей главе «Методика экспериментального исследования экструдирования и конвективной сушки смесей скоропортящихся пищевых отходов с зерновыми отходами» описаны средства получения и обработки данных экспериментальных исследований.

Процесс экструзии. Лабораторный стенд, разработанный на основе пресса-экструдера ПЭШ-30/4, позволял измерять возникающее в процессе экструзии давление в материале на конце канала шнека и перед матрицей, угловую скорость вращения шнека, потребляемую электрическую мощность процесса экструдирования, производительность экструдера. Лабораторный стенд был укомплектован двумя матрицами: с цилиндрической фильерой и щелевой фильерой в упругой оболочке и комплектом сменных шкивов.

Для определения давлений, развиваемых в шнековом прессующем механизме в процессе работы, на месте их измерения выполнены фланцевые разъемы в корпусе шнека. Каждый разъем стянут тремя болтами, под головки которых установлены тензометрические втулки. Втулки были изготовлены из незакаленной стали 45 (ГОСТ 1050-74). На каждой втулке наклеены два датчика 2ФКПА-5-50ХВ (ГОСТ 5.1535-72) – один в меридиональном направлении, а другой в окружном направлении. Оба датчика наклеены симметрично относительно срединной плоскости. Однотипные датчики каждого фланца включены последовательно в разные плечи измерительного полумоста. Усилия во фланцах определялись по тарировочным графикам осевого нагружения тензометрических втулок. Для регистрации показаний датчиков использован компьютер, получающий сигналы от АЦП LC-212F.

При обработке результатов экспериментальных исследований в качестве критерия оценки достоверности использовался коэффициент достоверности аппроксимации (детерминации) R^2 .

Измерение температуры производилось в установившемся режиме экструдирования при помощи цифрового минимультиметра М838, имеющего термопару типа «К».

Мощность сил полезного сопротивления определяли по электрической мощности с учетом потерь в двигателе и в передаточных механизмах.

Производительность экструдера определяли как массу экструдата за одну секунду экструдирования.

Для обеспечения требуемых режимов экструдирования применены стандартные и общепринятые методики подготовки сырья и определения технологических параметров процесса экструдирования.

Давления в материале в сечениях фланцев получены выражением нормальных напряжений, действующих на матрицу, и меридиональных касательных напряжений, действующих на корпус, через усилия во фланцах.

Коэффициенты уравнения Оствальда-де Вилля для экструдата получены из уравнений его движения через полость насадки на конце шнека и цилиндрический канал фильеры при известном объемном расходе экструдата и давлениях в экструдате в сечениях фланцев.

Толщина слоя проскальзывания приблизительно определяется, если известны нормальное напряжение в материале на конце шнека, объемный расход материала в канале и коэффициенты уравнения Оствальда-де Вилля. Из уравнения объемного расхода материала в канале шнека определяется u_0 . Из уравнения распределения скоростей в канале шнека вычисляется v_n . Наконец, из условия непрерывности скоростей в канале шнека находится h_n .

Коэффициент отклонения формы c_ϕ канала фильеры переменного сечения от цилиндрического вычислен из выражения (7).

Определение свойств полуфабриката, подготовленного к сушке.

Прочность сырых экструдатов на срез определялась при помощи прибора ПМ. Слипаемость массы сырых экструдатов определена на приборе ПМ по методу сдвига в насыпи полуфабриката.

Процесс конвективной сушки. Для исследования процесса конвективной сушки разработана лабораторная сушильная установка. Высушивание образцов происходит в сетчатом бунке в сушильной камере. Сверху камера открыта в атмосферу. Камера установлена на калорифере. Воздух в калорифер подается по воздуховоду от центробежного вентилятора низкого давления. Расход воздуха измеряется по входному коллектору. Угловая скорость вентилятора и накал спирали регулируются электронными преобразователями на тиристорах. Для измерения температуры использованы цифровые минимультиметры М838 с термопарой типа «К». Измеряется температура сушильного агента перед поступлением в сушильную камеру по показаниям сухого и мокрого термометров.

Влажность образцов определена стандартными методами.

Первая критическая влажность и постоянная скорость сушки найдены по экспериментальным кривым сушки графическим дифференцированием.

По измеренным параметрам процесса определены массообменные характеристики при постоянной скорости сушки: коэффициент влагопроводно-

сти, критерий Нуссельта, интенсивность влагоотдачи и коэффициент паропроводности. Определены массообменные характеристики при падающей скорости сушки: коэффициенты внешнего влагообмена и теплопроводности.

В четвертой главе «Экспериментальное определение параметров процессов утилизации смесей скоропортящихся пищевых отходов с зерновыми отходами» описаны результаты экспериментов по определению свойств полуфабрикатов в процессах экструдирования, сорбции и конвективной сушки.

При исследовании процесса экструдирования смеси дробины с зерноотходами в диапазоне влажности от 50 до 75 % через круглую фильеру с малым сопротивлением экструдированию и шелевую фильеру с большим сопротивлением установлено, что с ростом влажности производительность экструдера уменьшается линейно. Определены нормальные и касательные напряжения в экструдате на выходе из фильеры, от собственного веса экструдата. Установлено, что прочность экструдата снижается у нижней границы диапазона за счет образования трещин и у верхней границы за счет вязкого течения. Наибольшую производительность экструдер развивает при увлажнении зерноотходов дробинной до влажности 28 ... 30 %. Дальнейший ввод жидкости в экструдат осуществлялся за счет процесса сорбции. Сорбция позволяет утилизировать с единицей массы зерноотходов до 5,25 единиц массы дробины, что соответствует 0,3 ... 0,4 массы сухого вещества дробины.

Показано, что экструдирование не увеличивает содержания тяжелых металлов в полуфабрикате.

Произведено определение неизвестных внешних величин математической модели процесса экструдирования смесей дробины и барды с пшеничными отрубями. Получены следующие зависимости от относительной влажности W и температуры t для определения коэффициента консистенции смеси со спиртовой бардой

$$\mu' = 7,165 \cdot 10^{13} W^{-4,5544} t^{-1,4531}; \quad R^2 = 0,95; \quad (8)$$

и пивной дробинной

$$\mu' = 1,043 \cdot 10^{14} W^{-4,7119} t^{-1,3647} \quad R^2 = 0,97. \quad (9)$$

Для индекса течения эти же зависимости имеют соответственно вид

$$n = -0,3133 + 0,0147W + 0,0031t; \quad R^2 = 0,99; \quad (10)$$

$$n = -0,3765 + 0,0156W + 0,0032t \quad R^2 = 0,97. \quad (11)$$

Зависимости от относительной влажности, температуры и относительной скорости движения рабочих органов v_c для определения толщины слоя проскальзывания соответственно имеют вид при экструдировании смеси со спиртовой бардой

$$h_n = 1,18 \cdot 10^{-8} W^{0,4441} t^{-0,7155} |v_c|^{1,3159}; \quad R^2 = 0,93; \quad (12)$$

и пивной дробинной

$$h_n = 6,18 \cdot 10^{-11} W^{1,3844} t^{-0,3902} |v_c|^{0,2664} R^2 = 0,91. \quad (13)$$

Для коэффициента отклонения формы фильеры от цилиндрической получена зависимость

$$c_\phi = 2,385 \cdot 10^{-6} n^{9,914} (h_\phi / R)^{(0,73+1,46n)/n}; \quad R^2 = 0,99. \quad (14)$$

Высокое значение достоверности аппроксимации, позволяет использовать зависимости (8) ... (14) в дальнейших исследованиях.

Энергоемкость экструдирования, оценена по мощности сил полезного сопротивления в зависимости от параметров W , t и v_c . Показано, что при ограничении скорости рабочих органов экструдера, снижения энергоемкости следует добиваться увеличением относительной влажности экструдата. Если задана технологическая влажность экструдата, этого же следует добиваться увеличением относительной скорости рабочих органов экструдера.

Исследование сорбционных свойств экструдата было произведено методом снятия кривой сорбции. Сорбировалась дисперсионная среда отходов бродильных производств. Полуфабрикат имел цилиндрическую форму и форму ленты. Исходная влажность составляла 30 и 50 %. В части экспериментов экструдат перед сорбцией высушивали до влажности 12 %. Установлено, что в процессе сорбции имеется два периода: сорбции с постоянной скоростью и сорбции с убывающей скоростью. Скорость сорбции мало зависит от формы поперечного сечения экструдата и вида сырья, добавляемого к отрубям. При сорбции предварительно высушенным экструдатом наблюдается его разрушение в процессе сорбции. Наибольшее увлажнение (до влажности 84 %) достигается образцами с исходной влажностью 30 %. При этом образцы сохраняют необходимую для дальнейшей обработки прочность. Все исследованные образцы имели низкую степень слипаемости.

Определение параметров процесса конвективной сушки произведено для экструдатов из смесей пшеничных отрубей с пивной дробинкой и спиртовой бардой при двух значениях начальной влажности 25 и 45 %. Сушке подвергали образцы круглой формы и в виде ленты. Их располагали в бюксе в один слой, так, чтобы расстояние между образцами было одинаковым. При этом образцы в виде ленты устанавливали на ребро. Получены регрессионные зависимости для массообменных характеристик: коэффициентов влагопроводности при постоянной и убывающей скорости сушки, коэффициента паропроводности, коэффициента внешнего влагообмена, а также влажности в первой критической точке.

Было использовано уравнение регрессии вида

$$w = A_0 T_c^{A_1} T_m^{A_2} v^{A_3}, \quad (15)$$

где w – описываемый параметр процесса сушки;

T_c – температура агента сушки;

T_m – температура «мокрого» термометра;

v – средняя скорость сушильного агента в зоне сушки;

A_0, A_1, A_2, A_3 – коэффициенты уравнения регрессии.

Параметры, описанные выражением (15), имеют коэффициент детерминации от $R^2 = 0,79$ до $R^2 = 0,99$, что позволяет использовать их при расчетах рациональных режимов сушки.

В пятой главе «Реализация результатов исследований» предложен способ утилизации в кормовой продукт длительного хранения высоковлажных отходов бродильных производств с отходами переработки зерна в качестве сорбента, защищенный патентом РФ. При этом за счет кондуктивного массообмена получается продукт требуемой технологической влажности, который затем экструдирован. После экструдирования полуфабрикат, обладающий большой удельной поверхностью, подвергается конвективной сушке.

Предложен комплексный стоимостной критерий для оценки эффективности применения технологии реутилизации высоковлажных отходов бродильных производств.

Описана машинно-аппаратурная схема утилизации высоковлажных продуктов. Предлагаемая технология имеет по сравнению с известными аналогами низкие удельные затраты энергии на осуществление процесса; возможность реутилизации нескольких видов пищевых отходов; сохранение в получаемом продукте витаминов и других полезных веществ, разлагающихся при повышенных температурах.

Произведена оценка рассматриваемого способа при помощи предложенного стоимостного критерия, учитывающего безотходность технологического процесса, глубину переработки сырья и экологичность производства. Сделан вывод о его эффективности в сравнении с используемыми в регионе способами утилизации отходов бродильных производств. Предлагаемая технология повышает эффективность производства в основном за счет повышения уровня его безотходности. Глубина переработки отходов и экологические показатели остаются на том же уровне.

Описаны новые конструкции экструдированного оборудования, защищенные патентами РФ.

В заключение выполнен расчет экономической эффективности от внедрения технологии реутилизации отходов бродильных производств.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложенный (на основе патента РФ № 2248720) способ утилизации отходов бродильных производств и зерновых отходов, включающий экструдирование их смеси и последующую конвективную сушку, позволяет удерживать водорастворимые компоненты сырья в полученном сухом белково-витаминном продукте. Оценка этой технологии предложенным интегральным критерием эффективности технологического процесса, включающим критерии безотходности, глубины переработки сырья и экологичности, показала, что для разработанной технологии по сравнению с существующей критерий эффективности возрос за счет увеличения критерия безотходности.

2. Использование процесса сорбции дисперсионной среды на 40 % сокращает расход зерновых отходов. Полученные регрессионные зависимости позволяют определить время сорбции. Показана возможность сорбции дисперсионной среды экструдированным полуфабрикатом с исходной влажностью 30 % непосредственно после экструдирования до влажности 84 % независимо от формы поперечного сечения экструдата и увлажняющей среды.

3. Специализированное экструдировующее оборудование может быть оптимизировано на основе регрессионной зависимости для энергоемкости экструдирования, позволяющей определять температурный режим процесса, и экспериментально определенных реологических параметров полуфабриката как тела Оствальда-де Вилля μ' и n ; толщины слоя проскальзывания на дне канала шнека h_n и коэффициента отклонения формы канала фильеры перменного сечения от цилиндрического c_ϕ .

4. Экспериментально определенные внешние величины математической модели процесса конвективной сушки: коэффициент влагопроводности a_m и коэффициент паропроводности λ_{mp} для периода постоянной скорости сушки, влажность в первой критической точке W_{k1} , а также коэффициент влагопроводности a_m и коэффициент внешнего влагообмена α_{mi} для периода падающей скорости сушки позволяют вычислять рациональные режимы сушки полуфабриката.

5. Предложены конструкции матриц экструдеров с фильерами в упругой оболочке, предназначенные для экструдирования высоковлажных полуфабрикатов (патенты РФ № 2240918, № 2245249, № 2249420), а также конструкция экструдера, позволяющая снижать влажность полуфабриката в процессе экструдирования (патент РФ № 2243098), и конструкция, позволяющая получать полуфабрикат высокой влажности (патент РФ № 2251365).

6. Основные результаты работы приняты к внедрению на производстве и в учебном процессе высшей школы. Показано, что разработка имеет ожидаемый экономический эффект, поскольку чистый дисконтированный доход за три года составит 2034,78 тыс. руб., индекс доходности 2,09, срок окупаемости 1,48 года.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

1. О прочности экструдатов из растительных отходов при высокой влажности / С. П. Василевская, В. Ю. Полищук, В. П. Попов, В. П. Ханин // Оптимизация сложных биотехнологических систем : материалы Всерос. науч.-практ. конф. / Оренбург. гос. ун-т. - Оренбург : ОГУ, 2003. - С. 40-45.

2. Линия для обезвоживания высоковлажных вторичных сырьевых ресурсов / С. П. Василевская, В. Ю. Полищук, В. П. Попов, В. П. Ханин // Труды / Оренбург. регион. отд-ние Рос. инженер. акад. - Оренбург, 2003. - Вып. 3. - С. 156-161.

3. Антимонов, С. В. Пути решения проблемы переработки отходов в отрасли хлебопродуктов / С. В. Антимонов, С. П. Василевская // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. - 2003. - № 1. - С. 152-154.

4. Василевская, С. П. Утилизация отходов пищевых производств на основе сорбции с последующей сушкой / С. П. Василевская, В. П. Попов, В. П. Ханин // Роль университетской науки в региональном сообществе : материалы Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / Оренбург. гос. ун-т. - М. ; Оренбург : ОГУ, 2003. - Ч. 1. - С. 219-224.

5. Василевская, С. П. Измерение давлений в головке шнекового пресса / С. П. Василевская, А. Ш. Насыров // Прогрессивные технологии и оборудование пищевой промышленности : материалы II Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч. / Воронеж. гос. технол. акад. - Воронеж : ВГТА, 2004. - Ч. 2. - С. 112-114.

6. Василевская, С. П. Определение параметров экструдата в головке экструдера / С. П. Василевская, В. П. Ханин // Прогрессивные технологии и оборудование пищевой промышленности : материалы II Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч. / Воронеж. гос. технол. акад. - Воронеж : ВГТА, 2004. - Ч. 2. - С. 114-116.

7. Полищук, В. Ю. Оценка воздействия на экструдруемый материал в канале шнека экструдера. Развитие и внедрение эффективных энергосберегающих технологий / В. Ю. Полищук, С. П. Василевская // Труды / Оренбург. регион. отд-ние Рос. инженер. акад. - Оренбург, 2004. - Вып. 4. - С. 117-122.

8. Полищук, В. Ю. Оценка воздействия на экструдруемый материал насадкой типа «торпедо» на конце шнека экструдера. Развитие и внедрение эффективных энергосберегающих технологий / В. Ю. Полищук, С. П. Василевская // Труды / Оренбург. регион. отд-ние Рос. инженер. акад. - Оренбург, 2004. - Вып. 4. - С. 123-127.

9. Полищук, В. Ю. Движение материала в канале шнека при наличии пограничного слоя на дне канала / В. Ю. Полищук, С. П. Василевская // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. - 2004. - № 9. - С. 140-143.

10. Василевская, С. П. Сопротивление фильеры переменного сечения / С. П. Василевская, В. П. Ханин, В. Ю. Полищук // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. - 2004. - № 10. - С. 146-148.

11. Идентификация математической модели процесса экструдирования смеси спиртовой барды с пшеничными отрубями / С. П. Василевская, В. Ю. Полищук, С. Ю. Соловых, В. П. Ханин // Перспективы развития пищевой промышленности в России : материалы Всерос. науч.-практ. конф. / Оренбург. гос. ун-т. - Оренбург : ОГУ, 2005. - С. 50-53.

12. Василевская, С. П. Определение параметров процесса конвективной сушки экструдата смесей пшеничных отрубей с пивной дробинкой и спиртовой бардой / С. П. Василевская // Перспектива : сб. ст. молодых ученых / Оренбург. гос. ун-т. - Оренбург : ОГУ, 2005. - № 5. - С. 233-238.

13. Василевская, С. П. Оценка энергоемкости процесса экструдирования смесей пшеничных отрубей со спиртовой бардой при различных технологических режимах / С. П. Василевская, С. Ю. Соловых // Актуальные проблемы подготовки специалистов для предприятий пищевой промышленности : материалы Всерос. конф. / Оренбург. гос. ун-т. - Уфа ; Оренбург : ОГУ, 2005. - С. 23-27.

14. Пат. 2240918 Российская Федерация, МПК⁷ В 30 В 11/22. Матрица экструдера для полуфабрикатов малой прочности / Василевская С. П., Зубкова Т. М., Ханин В. П., Полищук В. Ю. ; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - № 2003110405 ; заявл. 11.04.03 ; опубл. 27.11.04 ; Бюл. № 33. - 3 с.

15. Пат. 2243098 Российская Федерация, МПК⁷ В 30 В 11/24, В 29 С 47/00, А 23 Р 1/12. Экструдер / Полищук В. Ю., Зубкова Т. М., Василевская С. П. ; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - № 2002133775 ; заявл. 15.12.02 ; опубл. 27.12.04 ; Бюл. № 36. - 3 с.

16. Пат. 2245249 Российская Федерация, МПК⁷ В 29 С 47/12, 47/16, 47/22, В 30 В 11/22. Матрица экструдера / Василевская С. П., Зубкова Т. М., Ханин В. П., Полищук В. Ю. ; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - № 2002110035 ; заявл. 08.04.03 ; опубл. 27.01.05 ; Бюл. № 3. - 3 с.

17. Пат. 2248720 Российская Федерация, МПК⁷ А 23 К 1/00, 1/10, А 23 Р 1/12. Способ утилизации высоковлажных пищевых отходов / Попов В. П., Василевская С. П. ; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - № 2003100285 ; заявл. 04.01.03 ; опубл. 27.03.05 ; Бюл. № 9. - 3 с.

18. Пат. 2249420 Российская Федерация, МПК⁷ А 23 Р 1/12. Матрица экструдера / Ханин В. П., Василевская С. П., Коротков В. Г., Зубкова Т. М. ; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - № 2003113159 ; заявл. 05.05.03 ; опубл. 10.04.05 ; Бюл. № 10. - 4 с.

19. Пат. 2251365 Российская Федерация, МПК⁷ А 23 Р 1/12, В 30 В 11/22. Экструдер высоковлажных продуктов / Ханин В. П., Василевская С. П., Попов В. П., Зубкова Т. М. ; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - № 2003123651 ; заявл. 25.07.03 ; опубл. 10.05.05 ; Бюл. № 13. - 3 с.

Отпечатано в типографии «Экспресс-печать»

12.02.2006 г

Свидетельство ЮО 17472

Г.Р.Н 304561003400204

Формат 60x84. Усл. печ. л. 1.2

Тираж 100 экз. зак. 17

г. Оренбург.

